

PROPUESTA DE MEJORA DE LA SENSIBILIDAD DEL ENSAYO SLAKE DURABILITY TEST PARA LA CARACTERIZACIÓN DE TALUDES EXCAVADOS EN ROCAS ARCILLOSAS

Joan MARTINEZ-BOFILL^{1,4*}, Jordi COROMINAS¹, Albert SOLER², Roc POLVOREDA¹ y José Antonio NAVARRO³

¹ Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica
Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya. C. Jordi Girona, 1-3, Building D-2, 08034. Barcelona. Spain

² Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Depósitos Minerales
Facultat de Geologia
Universitat de Barcelona. C. Martí Franqués, sn, 08034. Barcelona. Spain

³ Departamento de Movilidad e Infraestructuras Viarias
Diputación Foral de Gipuzkoa. Paseo de Miramón, 166, 20014, San Sebastián-Donostia. Spain

⁴ Geomar Enginyeria del Terreny, SLP
C. València, 1 subsòl local 12, 08015. Barcelona. Spain

RESUMEN

El Slake Durability Test (SDT) es el ensayo estándar de la International Society for Rock Mechanics para evaluar la durabilidad de las rocas arcillosas. Las principales limitaciones del SDT recaen en cual es el número óptimo de ciclos de ensayo, y la falta de sensibilidad en rocas que se degradan en fragmentos mayores a 2 mm. El objetivo de este trabajo es mejorar la sensibilidad del SDT y su potencial de predicción de la degradabilidad en desmontes. Se han caracterizado muestras de distintos taludes, previamente clasificados en función de su comportamiento frente a la alteración, para validar los índices obtenidos en laboratorio. Los resultados, sugieren que el SDT debería considerar la pérdida de la fracción granulométrica de 12,5 mm para reproducir de forma más adecuada la degradación de la roca. Los mejores resultados se obtienen realizando al menos 4 ciclos de ensayo, sobre muestra intacta y sobre muestra envejecida en ciclos de congelación.

1. INTRODUCCIÓN

Los taludes excavados en rocas blandas presentan un comportamiento complejo. Es habitual tener que realizar voladuras para excavar rocas arcillosas (p.e. lutitas, arcillitas, limolitas, o calizas arcillosas), y a pesar de ello, los taludes excavados pueden ser altamente susceptibles a la meteorización física, y disgregarse incluso en períodos muy cortos de tiempo, afectando tanto a la seguridad como a los costes de mantenimiento de carreteras y otras obras lineales. Sin embargo, este comportamiento no se puede generalizar. Así, algunos taludes se mantienen prácticamente intactos durante años, mientras que otros se degradan muy rápidamente.

Uno de los principales retos del ingeniero proyectista es definir cuál va a ser el comportamiento de los futuros taludes a medio y largo plazo. Existen diversos ensayos para caracterizar la durabilidad de las rocas arcillosas, como el Jar Slake Test, el Slake Index Test y el Slake Durability Test (SDT) siendo este último el ensayo de mayor consenso (Oakland & Lovell, 1985, Dick, 1995, Shakoor, 1995, Santi & Doyle, 1997, Hatheway, 1997). El SDT fue diseñado por Franklin & Chandra (1972), y actualmente es el ensayo estándar de la International Society for Rock Mechanics para medir la durabilidad al desmoronamiento de las rocas de grano fino (ISRM, 1981). Una de las principales ventajas del ensayo SDT es su sencillez y bajo coste económico.

A pesar de la amplia difusión en el uso del SDT, existe aún cierta controversia sobre su uso e interpretación de resultados, que ha dado lugar a una extensa bibliografía. La principal discusión recae sobre cuál es el número óptimo de ciclos a llevar a cabo en el ensayo SDT. Algunos autores recomiendan realizar 3 o más ciclos para caracterizar la durabilidad de las limolitas (Taylor, 1988, Moon & Beattie, 1995, Ulusay et al., 1995, Bell et al., 1997). Gokçeöglu et al. (2000) and Gokçeöglu & Aksoy (2000) recomiendan realizar 4 ciclos, y Dhakal et al (2002, 2003) llevan a cabo entre 10 y 20 ciclos para caracterizar la durabilidad de algunas limolitas y arcillitas. En la actualidad, la mayor parte de los autores realizan entre 4 y 5 ciclos para caracterizar la durabilidad de las rocas arcillosas.

Otro debate consiste en la falta de sensibilidad del ensayo SDT. El índice de durabilidad no tiene en cuenta el grado de desmenuzamiento de cada tipo de roca, tal como se recoge en los trabajos de Taylor & Spears (1981), Moon and Beattie (1995), Gokceoglu et al, (2000), Sadisun et al. (2005), Erguler (2007) and Erguler & Ulusay (2007) and Erguler and Ulusay (2009). Este factor se debe tener especialmente en cuenta cuando se ensayan muestras que se desmoronan en fragmentos pequeños, pero de tamaño superior a 2 mm (Czereweko & Cripps, 2001). Esta es una limitación importante que debe ser tomada en cuenta cuando se realice el ensayo SDT. Para superar dicha limitación, la American Society for Testing Materials (ASTM, 1996) propone una metodología basada en el aspecto de la muestra retenida en el tambor de ensayo. El sistema consiste en comparar el material retenido con unas fotografías, y clasificarlo dentro de 3 categorías denominadas

tipo I, tipo II y tipo III, que complementan el valor de Id_2 obtenido. El tipo I corresponde a los materiales retenidos que prácticamente no han sufrido cambios respecto la muestra original. El tipo II corresponde a una mezcla de fragmentos de tamaño grande y pequeño. El tipo III corresponde a un material formado en su práctica totalidad por fragmentos de pequeño tamaño. La ISRM (2007) también recomienda describir el aspecto del material retenido en el tambor, después de completar los ciclos de ensayo en SDT. Erguler & Shakoor (2009) proponen un método cuantitativo de descripción de los materiales, basado en la distribución granulométrica del material ensayado, mediante la obtención de la “razón o proporción de desintegración” definida como la relación entre el área debajo de la curva granulométrica del material ensayado y el área total.

El objetivo del presente artículo, es proponer una mejora cuantitativa de la sensibilidad del ensayo SDT basada en la distribución granulométrica del material retenido en el tambor después del ensayo. Para ello se han caracterizado muestras de distintos taludes, previamente clasificados en función de la alteración de su superficie, para validar los índices obtenidos en laboratorio, y su capacidad para predecir el comportamiento en obra, a medio y largo plazo.

2. ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en el interior de la provincia de Gipuzkoa, en Euskadi, en el sector occidental del macizo de los Pirineos, dentro de la zona climática denominada vertiente atlántica de Euskadi. Esta zona presenta un tipo de clima mesotérmico o clima atlántico, moderado en cuanto a las temperaturas, y muy lluvioso. En este clima las oscilaciones térmicas entre la noche y el día, o entre el verano y el invierno son poco acusadas, con temperaturas suaves (Euskalmet, 2011). Las temperaturas medias anuales registran en la costa los valores más altos de unos 14°C. Aunque los veranos sean frescos, son posibles, sin embargo, episodios cortos de fuerte calor, con subidas de temperatura de hasta 40°C. El factor orográfico explica la gran cantidad de lluvias de toda la vertiente atlántica de Euskadi, entre 1.200 y más de 2.000 mm de precipitación media anual.

Geológicamente, el área de estudio se encuentra dentro de la región denominada como Arco Vasco, formada predominantemente por materiales de edad Cretácico. En nuestro caso, la unidad geológica estudiada corresponde al Flysch negro del Complejo Supraurgoniano, de edad comprendida entre el Albiense superior (Cretácico Inferior) hasta el Cenomaniense Inferior (Cretácico Superior), formadas por limolitas micacíticas, de color gris azulado a negro, generalmente masivas, con intercalaciones frecuentes de areniscas. Este periodo se encuentra ampliamente representado en esta área. Esta unidad tiene un espesor aproximado de unos 1000 m (EVE, 2006). El Flysch negro está formado por materiales detríticos, con una alternancia de limolitas y arcillitas, con areniscas intercaladas. La proporción entre estos materiales puede variar desde un punto a otra, pero en general las areniscas tienden a ser escasas, con una proporción inferior al 20%. Las

limolitas y arcillitas son usualmente de color gris y negro, de composición silíceas y muestran cierta foliación o esquistosidad. Las areniscas son grises en fractura fresca, o de color marrón cuando se alteran. Se encuentran en capas o estratos que oscilan entre pocos centímetros hasta algunos decímetros, pero en general no sobrepasan los 50 cm de potencia. Su estructura interna es masiva.

3. METODOLOGÍA

Se han obtenido 25 muestras, procedentes de los desmontes entre los P.K. 413,065 y 414,650 de la N-I y entre los P.K. 3,700 y 4,710 de la GI-632, en las localidades de Idiazábal y Ormaiztegui (Gipuzkoa). Los taludes muestran un aspecto altamente deteriorado, y presentan mecanismos de degradación y caídas locales que afectan a su superficie. Se observa el desmenuzamiento de la roca, en fragmentos que se desprenden causando erosión y regresión del frente del talud. Estos fragmentos a menudo tienen morfología elongada o de lápiz. También se observa disyunción esferoidal de la roca, que da lugar a pequeños deslizamientos siguiendo fracturas de tipo lístrico. El material acumulado a pie de talud se disgrega en forma de gravilla pero no se degrada a limo y arcilla (Figura 1). A pesar de estos problemas de alteración superficial, la estabilidad general del talud no se ha visto afectada, y no se han detectado deslizamientos de gran magnitud.



Figura 1. Izquierda: aspecto de la superficie alterada de los taludes. Derecha: detalle de los materiales desmenuzados en fragmentos elongados de tamaño gravilla.

Clasificación del comportamiento los taludes frente a la meteorización

La caracterización de campo ha consistido en realizar una descripción del potencial de degradabilidad de los taludes de acuerdo con los criterios descritos en Martínez-Bofill et al. (2004). Cada talud está referenciado con su situación geográfica, orientación y dimensiones, la litología, la estratigrafía detallada y la caracterización geomecánica del macizo rocoso. Se ha evaluado el comportamiento de cada talud, prestando especial atención a las patologías

derivadas de la puesta en obra, tales como la formación y dimensiones de techos, caída de bloques, retroceso del talud, presencia de grietas de descompresión, retroceso específico respecto a los taladros de perforación... Los taludes se han agrupado en cinco categorías que se resumen a continuación:

- Tipo 1: taludes que permanecen prácticamente intactos durante el periodo de vida útil de la infraestructura.
- Tipo 2: taludes que experimentan a medio plazo un agrietamiento esporádico de la superficie del mismo, con caídas ocasionales y cuyos fragmentos se acumulan al pie del talud sin apenas descomponerse.
- Tipo 3: talud degradable a medio plazo. Tendencia al retroceso y caídas frecuentes de bloques (a menudo, fracturas lítricas). La roca se desmenuza pero no se descompone en arcilla o limo.
- Tipo 4: talud con tendencia a formar una capa de regolito en superficie. Da lugar a cárcavas, frecuentes caídas de bloques y deslizamientos superficiales. La roca se descompone en arcilla o limo.
- Tipo 5: talud constituido por arcillas y limos pobremente endurecidos o litificados. Acarcavamiento intenso de la superficie y formación de deslizamientos rotacionales. Las características erosivas y resistentes de los materiales no es el resultado de un proceso de alteración sino que se trata de sedimentos que no han litificado.

Los taludes han sido muestreados sistemáticamente, y se han obtenido testigos de 90 mm de diámetro y hasta 3,0 m de longitud, que han sido enviados a laboratorio. Las muestras obtenidas corresponden al tipo II (2 muestras), tipo III o durabilidad media (20 muestras) y tipo IV o baja durabilidad (3 muestras). La mayor parte de las muestras corresponde a taludes de tipo III pero próximos al límite de categoría IV.

Caracterización de la durabilidad

Las muestras obtenidas se han identificado y posteriormente ensayado con el Slake Durability Test (SDT) según el procedimiento descrito por Franklin & Chandra (1972). El ensayo SDT consiste en emplazar 10 fragmentos de tamaño regular, con un peso entre 40 y 60 g cada uno, dentro de un tambor cilíndrico cuya superficie lateral es una malla rígida de 2 mm de abertura. El tambor se dispone de forma horizontal, dentro de un tanque lleno de agua hasta un nivel de 2 cm por debajo del eje de rotación del cilindro. El ensayo propiamente consiste en someter a rotación el tambor y la muestra durante un periodo de 10 minutos a una velocidad de 20 rpm. La muestra retenida dentro del tambor se seca en estufa y se pesa. Los resultados se dan utilizando el Índice Sehudes (Id_2), que corresponde a la relación entre el peso final e inicial de la muestra, expresado como porcentaje, después de dos ciclos de desgaste SDT. En cualquier caso, en este estudio, se han llevado a cabo un total de cinco ciclos SDT en cada muestra, obteniendo el Índice de Durabilidad Id_5 .

Las muestras extraídas en cada talud se dividieron en tres grupos (Martínez-Bofill, 2011). Un

grupo ha sido ensayado sin tratamiento previo y representa las condiciones de la roca intacta con el talud recién excavado. Para simular los cambios de humedad en los taludes, se ha ensayado un segundo grupo de muestras después de someterlas a un proceso de envejecimiento de 15 ciclos de humedad-secado de 24 horas de duración (muestras H-S). Cada ciclo consiste en introducir las muestras en una estufa a 105°C durante un periodo de 12 horas y después introducir las muestras en una cámara húmeda a la temperatura de 22°C durante el mismo lapso de tiempo. Finalmente, un tercer grupo de muestras se ha sometido a un proceso de envejecimiento de 15 ciclos de hielo-deshielo (ASTM, 1997) de 24 horas de duración, antes de ensayarlas en el SDT (muestras H-D). Las muestras se sumergen previamente en una solución de alcohol isopropil al 0,5% antes de colocarlas en un congelador a una temperatura de -18°C durante 12 horas, y posteriormente colocarlas en una cámara húmeda a 22° durante el mismo tiempo. Para poder comparar visualmente la evolución durante el proceso de envejecimiento, y después de ensayarlas con el SDT, se han utilizado muestras de morfología cúbica, de 30 mm de altura. Las muestras han sido obtenidas a partir de tallado de testigos cilíndricos de sondeo de 90 mm de diámetro, utilizando una sierra de precisión, con una velocidad media de avance 1,2 mm/minuto, y disco de diamante para evitar cualquier daño a las muestras. Después de los procesos de envejecimiento y del ensayo en SDT, se ha procedido a la realización de granulometrías sobre el material retenido por la malla de 2 mm del tamiz del tambor del equipo de ensayo.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el Índice Sehudes (Id_2) sobre las muestras intactas presentan resultados homogéneos, con altos valores de durabilidad ($Id_2 > 90$) en todos los casos, y el 68% de las muestras con $Id_2 > 95$, por lo que deberían ser clasificadas como muy durables. Los resultados después del quinto ciclo (Id_5) muestran que el 72% de las muestras presentan una durabilidad alta ($Id_5 > 90$), el 24% de las muestras presentan una durabilidad media a alta ($90 > Id_5 > 80$), y finalmente 1 muestra presenta un valor de durabilidad medio, con un valor de Id_5 de 77,8. Se comprueba que llevar a cabo dos ciclos no es suficiente para caracterizar la durabilidad de las rocas arcillosas, y que a mayor número de ciclos mejora la discriminación de su comportamiento (Figura 2). Sin embargo, estos resultados no concuerdan con el comportamiento observados en los taludes, que presentan un grado de alteración medio a alto. Por tanto, el ensayo SDT no permite caracterizar con certeza el comportamiento a medio plazo de los taludes. (Figura 3).

Las muestras ensayadas después de ser sometidas a un proceso de envejecimiento de 15 ciclos de humedad-secado, presentan unos valores similares a los obtenidos sobre las muestras intactas. En el segundo ciclo (Id_2), todas las muestras presentan valores de durabilidad superiores a 90, y 15 de ellas superiores a 95. Para el quinto ciclo de ensayo (Id_5) los valores de durabilidad oscilan entre un mínimo de 72,7 y un máximo de 98,8, clasificándose como de durabilidad media a muy alta.

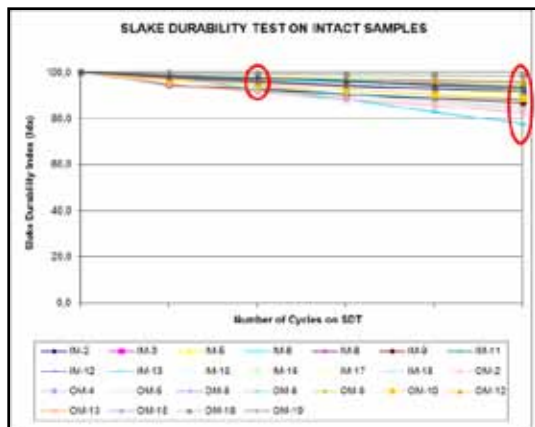


Figura 2. Resultados del SDT sobre muestras intactas. Se observa que a mayor número de ciclos, mejora la discriminación del comportamiento de la muestra.

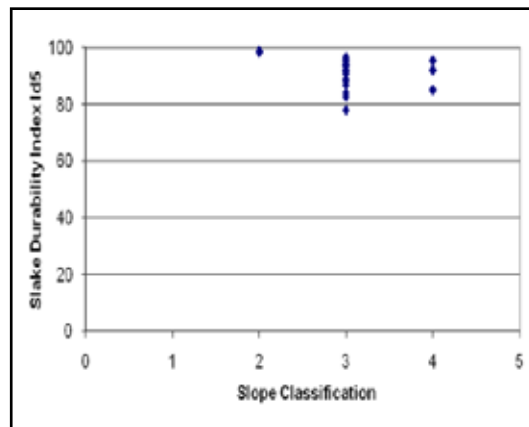


Figura 3. Resultados del SDT para el quinto ciclo (Id5) relacionados con la clasificación de los taludes. Los resultados del SDT no permiten explicar el comportamiento de los taludes.

El proceso de envejecimiento de las muestras mediante ciclos de hielo-deshielo ha provocado un evidente deterioro de las muestras. Algunas arcillitas incluso se han fisurado y desmoronado rápidamente nada más sumergirse en la solución de alcohol isopropil al 0,5%. Se observa que el envejecimiento por hielo-deshielo, no descompone a limo y arcilla, y que la mayor parte de las muestras se disgregan en fragmentos de tamaño superior a la arena gruesa o la grava fina. Para cuantificar este desmoronamiento, se han realizado granulometrías por tamizado sobre el material envejecido. Todas las muestras, excepto una, presentan una pérdida de material muy baja (<2%) en el cernido del tamiz de 2 mm. Este paso de malla de 2 mm equivale a la apertura de malla del tambor del ensayo SDT. La muestra IM-18 muestra una elevada pérdida de material que alcanza un valor del 50%. Los resultados obtenidos confirman que las muestras se disgregan en fragmentos de tamaño superior a los 2 mm, y que prácticamente no se descomponen en fango o arena. Se constata pues, la necesidad de realizar granulometrías por tamizado para evaluar el grado de degradación de las muestras envejecidas en hielo-deshielo, y la falta de sensibilidad de la malla de 2 mm para valorar el comportamiento de los materiales.

Una vez completado el proceso de envejecimiento en hielo-deshielo, se ha procedido a ensayar las muestras envejecidas en el equipo SDT. En la Figura 4 se ha representado el valor medido de durabilidad para cada ciclo de ensayo de desgaste en SDT. Al valor de durabilidad se le ha sustraído la pérdida de masa del tamiz UNE 2,0 mm después del ensayo hielo-deshielo. Se observa que las muestras sometidas al proceso de envejecimiento en hielo-deshielo presentan una durabilidad menor que las muestras intactas, situándose el rango de durabilidad para el quinto ciclo de ensayo (Id5 H-D) entre 98,7 y 52,6, excepto una muestra (IM-18) con un valor de durabilidad muy bajo de 6,7. De las muestras ensayadas, tan solo 2, tienen un valor de Id5 H-D superior a 95, y la mayor parte de ellas (18) tienen una durabilidad inferior a 90.

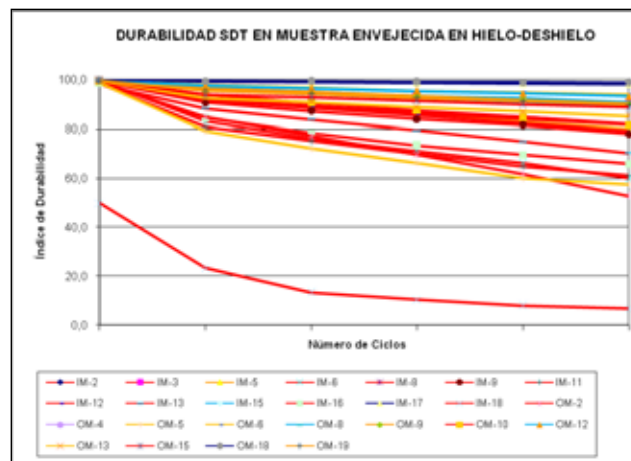


Figura 4. Distribución de las curvas de durabilidad de los ciclos de desgaste en SDT, en las muestras envejecidas en ciclos de Hielo-Deshielo. Se observa una cierta tendencia lineal en los valores más durables.

La observación de las muestras después del ensayo SDT, así como después de los ciclos de envejecimiento, han puesto en evidencia que el ensayo SDT causa fisuración y desagregación de las muestras, pero la pérdida de masa inferior a 2,0 mm que determina el índice Id2 o Id5 no representa de manera apropiada el proceso de degradación la roca. Se observa que muestras de gran durabilidad mantienen prácticamente intactas la forma y dimensiones de los fragmentos ensayados mientras que en otras, menos durables, los fragmentos se rompen en pedazos de tamaño mayor a 2,0 mm. Al tener los fragmentos un tamaño mayor que el de la apertura del tamiz, no computan como fracción descompuesta. Ambas muestras experimentan un comportamiento distinto pero, sin embargo, dan lugar a un mismo valor de durabilidad. (Figura 5). De todo ello, se deduce la necesidad de refinar y reinterpretar los valores obtenidos en el ensayo SDT.



Figura 5. Aspecto de 3 muestras de comportamiento desigual. Izquierda, alta durabilidad en SDT y buen comportamiento de campo. Derecha, baja durabilidad en SDT y mal comportamiento en campo. Centro, muestra con alta durabilidad en SDT al desmoronarse en fragmentos $>$ a 2,0 mm, y comportamiento en campo de elevada degradabilidad, similar a la muestra de la derecha.

Para compensar esta falta de sensibilidad del ensayo SDT, hemos realizado granulometrías por tamizado sobre las muestras ya ensayadas. Se ha usado como valor de referencia el porcentaje de fracción que pasa por el tamiz UNE 10,0 mm y 12,5 mm, sobre la muestra retenida por el tambor después de la realización del quinto ciclo de durabilidad (Id_5) en SDT. Se propone una corrección del índice de durabilidad, según la Ecuación 1:

$$Id5_{corregida(10,0mm)} = \frac{Id5(100 - \% \text{ pasatamiz } 10,0mm)}{100} \quad (1)$$

En la Figura 6 se ha representado la distribución de las curvas de durabilidad de los ciclos de desgaste en SDT, en las muestras envejecidas en ciclos de Hielo-Deshielo, añadiendo la corrección al valor Id_5 para 10,0 mm y 12,5 mm.

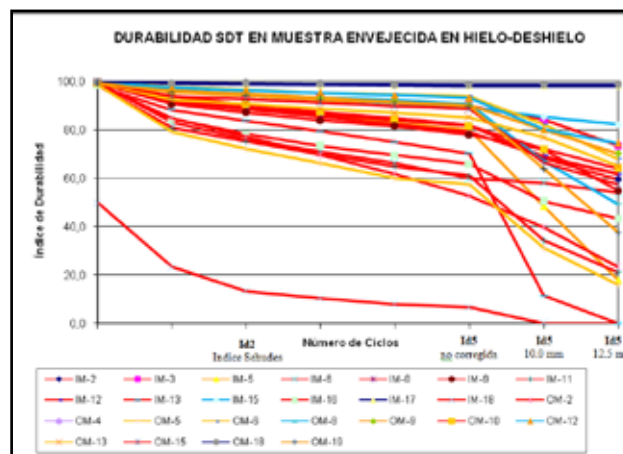


Figura 6. Distribución de las curvas de durabilidad de los ciclos de desgaste en SDT, en las muestras envejecidas en ciclos de Hielo-Deshielo, y añadiendo la corrección al valor Id_5 para 10,0 mm y 12,5 mm.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se ha discutido la significación y representabilidad de los resultados obtenidos en el ensayo SDT, y el uso del mismo para predecir el comportamiento de los taludes a medio y largo plazo. Se constata que la correspondencia entre el grado de conservación de los desmontes y los ensayos convencionales de durabilidad existe pero no es directa ni inequívoca. Se ha podido observar que los resultados del ensayo SDT en roca intacta, el más aceptado para determinar la durabilidad, no permiten predecir de forma adecuada el comportamiento futuro de la excavación. Se observa que los resultados del Id_2 sobre muestra intacta son sistemáticamente muy optimistas, clasificando las rocas como de alta o muy alta durabilidad

Si se llevan a cabo cinco ciclos de ensayo (Id5), se observa una tendencia a diferenciar comportamientos, ya que a partir del tercer ciclo (Id3) el índice de durabilidad de algunas muestras diverge ligeramente (Figura 2). Sin embargo, los resultados obtenidos no explican el comportamiento en el talud de las muestras. La observación de las muestras después del ensayo SDT y de los ciclos de envejecimiento, han puesto en evidencia que el ensayo SDT causa fisuración y desagregación de las muestras, pero la pérdida de masa inferior a 2,0 mm que determina el índice Id2 o Id5 no representa de manera suficiente el proceso de degradación la roca. Se observa que muestras de gran durabilidad mantienen prácticamente intactas la forma y dimensiones de los fragmentos ensayados mientras que en otras, menos durables, los fragmentos se rompen en pedazos de tamaño mayor a 2,0 mm. Al tener los fragmentos un tamaño mayor que el de la apertura del tamiz, no computan como fracción descompuesta. Ambas muestras experimentan un comportamiento distinto pero, sin embargo, dan lugar a un mismo valor de durabilidad. (Figura 5).

En la figura 7 se muestran los valores de durabilidad para el quinto ciclo (Id5) antes y después de ser corregidos utilizando el tamiz 12,5 mm. Se observa que las muestras pertenecientes a los taludes de tipo 2 no sufren cambios. Las muestras de los taludes tipo 3 se ajustan mejor al comportamiento esperado con una durabilidad que se encuentra mayoritariamente en valores que oscilan entre el 40% y 80%. De esta forma, la corrección granulométrica permite discriminar entre los taludes de tipo 2 y tipo 3. En 4 muestras de la categoría 3, se observa un ajuste que disminuye de forma sensible la durabilidad hasta valores que se encuentran entre el 10 y 40%. Las muestras de los taludes de tipo 4 presentan una caída del valor de durabilidad entre 0 y 15% para la corrección con el tamiz 12,5 mm. La corrección granulométrica teniendo en cuenta la pérdida de 12,5 mm permite una mejor predicción del desmoronamiento y erosión de las superficies de los taludes excavados a medio y largo plazo, si bien esta relación no siempre es biunívoca.

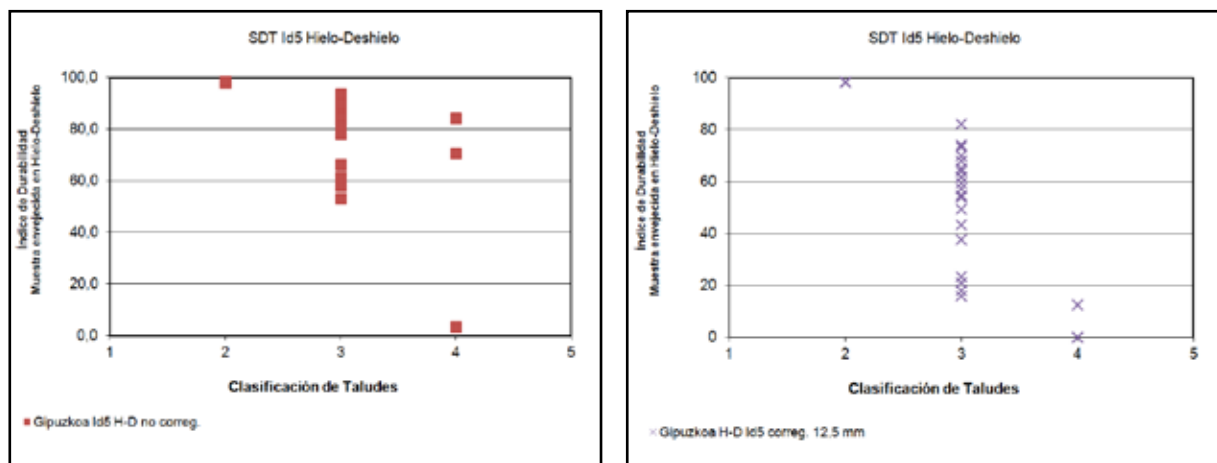


Figura 7. Valores de durabilidad para el quinto ciclo en SDT sobre muestra envejecida en hielo-deshielo sin corrección granulométrica (izquierda), y aplicando corrección granulométrica por el tamiz 12,5 mm (derecha).

6. CONCLUSIONES

El objetivo del presente estudio es proponer una metodología para la mejora de la sensibilidad del ensayo Slake Durability Test para la caracterización de taludes excavados en rocas arcillosas. Para ello se han realizado ensayos SDT sobre muestras intactas, y después de ser sometidas a ciclos de envejecimiento en ciclos de humectación y de congelación. Para mejorar la sensibilidad del ensayo SDT, se han realizado granulometrías por tamizado sobre el material retenido después de los ciclos de envejecimiento y después del ensayo SDT. Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio han sido confrontados con las características de degradabilidad y durabilidad observadas en los taludes donde se han obtenido las muestras.

A partir de los datos presentados y discutidos anteriormente, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los valores de durabilidad SDT en muestra intacta se solapan entre las distintas categorías de talud, no permitiendo una eficaz discriminación entre ellas. Se concluye que el índice de durabilidad obtenido a partir del ensayo SDT sobre muestra intacta no permite predecir la degradabilidad de los taludes a medio y largo plazo.
- Los ensayos de SDT en muestras envejecidas en 15 ciclos en humedad-secado, no permiten discriminar entre los distintos comportamientos de los taludes.
- Se observa, que la combinación de ciclos de congelación y los ensayos SDT, y su comparación con los resultados obtenidos en muestra intacta, permiten una mejor predicción del desmoronamiento y erosión de las superficies de los taludes excavados a medio y largo plazo, si bien esta relación no siempre es biunívoca. En particular, muestras de alta durabilidad en el SDT después de ciclos de hielo-deshielo, pueden dar lugar a taludes de degradabilidad media (tipo III).
- Este comportamiento se puede anticipar mejor si se tiene en cuenta como pérdida del SDT la fracción inferior a 12,5 mm generada durante el ensayo.
- La corrección granulométrica utilizando el tamiz 12,5 mm, permite diferenciar entre los taludes de tipo 2 (poco degradables), y los taludes de tipo 3 (degradables a medio plazo) y de tipo 4 (degradables a corto plazo).
- El tipo de ensayos de durabilidad realizados, o el número de ciclos de envejecimiento no permiten diferenciar de forma biunívoca entre las categorías de taludes de tipo 3, de degradabilidad media y taludes de tipo 4, de degradabilidad media-alta, si bien aporta información.

Así, podemos concluir que la propuesta de corrección granulométrica del ensayo SDT, sobre los valores de durabilidad de las muestras intactas, junto con las muestras envejecidas en hielo-deshielo, ayudan a una mejor predicción de la alterabilidad de los taludes.

7. REFERENCIAS

- American Society of Testing and Materials ASTM (1996). *Annual Book of ASTM Standards, Soil and Rock*: Vol. 4.08, Section 4, ASTM, West Conshohockeb, PA, 950 p.
- American Society of Testing and Materials ASTM. (1997). *Standard test method for evaluation of durability of rock for erosion control under freezing and thawing conditions*. Designation D 5312 – 92 (Reapproved 1997). pp. 190-192
- Czereweko, M.A.; Cripps, J.C. (2001) Assessing the durability of mudrocks using the modified jar slake index test. *Quarterly Journal of Engineering Geology & Hidrogeology*. Geological Society of London. v. 34, n° 2, pp. 153-163
- Dick, J.; Shakoor, A., 1995. Characterizing durability of mudrocks for slope stability purposes. A: Haneberg, W.C.; Anderson, S.A. (Editors). *Clay and Shale Slope Instability*. Boulder, Colorado, Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology. v. X: 121-130
- Erguler, Z. A. & Shakoor, A. (2009). Quantification of Fragment Size Distribution of Clay-Bearing Rocks after SDT Testing. *Environmental & Engineering Geoscience*. Vol. XV, n° 2, pp. 81-89
- Franklin, JA & Chandra, A., 1972. The slake durability test. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. Vol. 9, pp. 325-341.
- Gökçeoğlu, C.; Ulusay, R.; Sönmez, H., 2000. Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles. *Engineering Geology*. 57: 215-237
- Hatheway, A. W. (1997) Origins and formation of weak-rocks: A guide to field work. In: Santi, P.; Shakoor, A. (ed) *Characterization of weak and weathered rock masses*. Association of Engineering Geologists. 1997. Special publication n° 9. Sudbury, Massachusetts
- International Society for Rock Mechanics ISRM (1981) Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties, and swelling, and slake-durability index properties. *International Journal of Rock mechanics and Mining Science and Geomechanical Abstracts*. vol. 16, pp. 141-156
- International Society for Rock Mechanics ISRM (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. In Ulusay, R. And Hudson, J.A. (Editors), *Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods*: International Society for Rock Mechanics (ISRM), Ankara, Turkey.
- Martinez-Bofill, J, Corominas, J, Soler, A., 2004. Behaviour of the weak rock cutslopes and their characterization using the results of the Slake Durability Test. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*. 104. Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. pp. 405-413
- Martinez-Bofill, J. (2011) Criterios para determinar la degradabilidad y durabilidad de las rocas arcillosas y su aplicación en excavaciones y desmontes. Corominas, J.; Soler, A. (directors). *Tesi doctoral*, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica. Barcelona.
- Moon, V. G.; Beattie, A. G., 1995. Textural and microstructural influences on the durability of Waikato Coal Measures mudrocks. *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 28: 303-312
- Shakoor, A. (1995) Slope stability considerations in differentially weathered mudrocks. In: Haneberg, W.C.; Anderson, S.A. (eds). *Clay and Shale Slope Instability*. Boulder, Colorado, Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology. v. 10, pp. 131-138
- Taylor, R. K. (1988). Coal Measures mudrocks: composition, classification and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 21, 85-99.